

超快速加载 Buck 变换器设计

倪 雨

(成都信息工程学院控制工程学院, 四川成都 610225)

摘 要: 为了提高 VRM 的加载响应速度, 该文分析了传统 Buck 变换器的最优加载过程, 并基于传统 Buck 变换器提出了双输入 Buck 变换器电路方案, 说明了其稳态工作过程和加载运行过程, 以最优加载阈值为依据给出了附加电源的切换条件, 并做了仿真对比研究. 仿真和试验结果表明双输入 Buck 变换器较传统 Buck 变换器具有更快加载响应速度和更小输出电压跌落, 且结构简单, 易于设计和实现, 适用于 VRM 主电路.

关键词: 电压调节模块; 最优负载瞬态特性; 双输入 Buck 变换器; 加载阈值

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 08-1598-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.08.023

Design of Ultra Fast Step-up Buck Converter

NI Yu

(College of Automatic Control Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China)

Abstract: To improve the VRM's step-up response speed, the optimal loading of a traditional buck converter was analyzed, based on that the dual-input buck converter was proposed, then its steady work process and the optimal loading operation process was described. The additional power switching conditions were given by the optimal loading threshold. Finally, the comparative simulation study was carried out for both. The simulation and experimental results show that the dual input buck converter is faster response speed and smaller output voltage drop amount than the traditional buck converter, and the simple structure, easy to design and implement, suitable as the VRM main circuit.

Key words: VRM; optimal load transient performance; dual-input buck converter; loading threshold

1 引言

电压调节模块 (Voltage Regulator Module, VRM) 为微处理器等超大规模数字集成电路提供低电压大电流的功率^[1], 并且提供快速的负载瞬态响应速度和电压调节精度, 其负载瞬态特性取决于主电路和控制方法.

优秀的控制方法能够使 VRM 获得很好的控制效果^[2~8]. 优化 VRM 主电路的结构和参数是改善负载瞬态特性的另一途径, 文献[9]采用耦合电感思想使 VRM 同时获得良好的稳态性能和瞬态性能. 文献[10]提出的辅助电源法提高了 VRM 的瞬态特性, 但电路实现复杂且体积庞大, 不宜作为 VRM 的拓扑方案. 文献[11]在输出滤波电容和负载之间设计了一个负载瞬态电压调节器, 提高了负载瞬态响应能力, 但电路拓扑及其控制电路很复杂. 文献[12]从系统的角度研究了同步 Buck 变换器在临界带宽时具有最佳负载瞬态特性, 并给出了临界参数的选取方法. 文献[13]采用瞬态小电感法改善了 VRM 的负载瞬态特性. 文献[14]采用提高电感端电压

技术设计的 VRM 获得了很好的减载瞬态特性. 文献[15]附加设计了一种瞬态响应加速电路, 获得了更快动态速度和更低静态工作电流. 文献[16]提出了 Buck 变换器的加(减)载阈值概念, 推导了最优负载瞬态特性表达式. 研究表明, 改善 VRM 的瞬态特性必须首先提高主电路的最优负载瞬态特性.

本文基于 Buck 变换器提出了一种改进的 Buck 变换器方案. 下文详细描述工作方式, 说明控制原理, 仿真对比研究两种 Buck 变换器的最优加载瞬态特性, 并通过实验验证改进 Buck 变换器具有更好加载瞬态特性.

2 Buck 变换器加载响应分析

根据 Buck 变换器的工作特点, 功率开关管导通时, 电感电流上升, 电源通过电感传递功率给负载, 因此, 制约 Buck 变换器加载性能的关键是电感电流的上升速度. 为了获得具有更快加载响应速度的 VRM 电路, 本节主要分析传统 Buck 变换器的最优加载响应过程.

2.1 最优负载瞬态特性概念

开关变换器的最优负载瞬态特性是指开关变换器功率回路的电路参数确定后,负载阶跃变化时,开关变换器的输出电压波动最小,且输出滤波电容恢复到稳定运行状态的时间最短的特性^[16].在如图 1 所示 Buck 变换器中,除了存在电容等效串联电阻外,所有的电路元件均是理想元件.

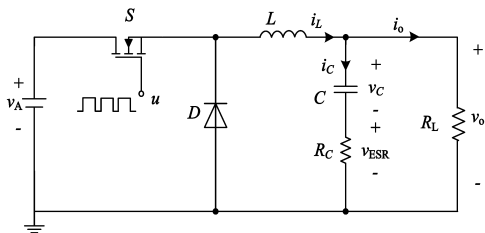


图1 Buck变换器

2.2 最优加载瞬态工作过程

文献[16]阐述了 Buck 最优加载瞬态工作过程是输出电容的一个放电充电过程.减少放电电荷量,补充该流失电荷量所需的时间则越短,加载响应时间则越短.分析电容放电过程发现,电感电流上升越快,电容放电时间减少,电容流失的电荷越少.可见,提高 Buck 变换器加载响应速度的关键是提高电感电流的上升速度.

电感电流的上升速度与电感值成反比,与电感端电压成正比,减少电感量或增大电感端电压都可以提高电感电流的上升速度.文献[11]正是基于改变电感量的思想改善了 VRM 的负载瞬态特性.文献[14]则是基于增加电感放电端电压的思想实现了 Buck 变换器减载快速响应.本文采用增大加载时电感端电压的方法提升 Buck 变换器加载瞬态响应速度,以下详述分析过程.

3 双电压输入 Buck 变换器

为了增大加载时的电感端电压,我们提出了如图 3 所示的双电压输入 Buck 变换器.有关双输入 Buck 变换器的同名研究论文较多^[17,18],但主要用于分布式发电系统中解决多种类型电源输入问题,需要采用复杂的能量管理策略进行控制,实现新能源的稳定发电.本文提出的双输入变换器与新能源发电系统的双输入 Buck 的最大不同是,本文附加电源(后备电源)仅仅工作于

负载跃变量较大的场合,满足加载速度快和输出电压跌落量小的需要.

由图 2 可知,双输入 Buck 变换器较传统 Buck 变换器多一个输入电压源和两个功率开关管. v_B 是附加电源, K_2 是附加电源开关, K_1 是同步开关.工作过程如下.

3.1 稳态运行

双输入 Buck 变换器稳态运行电路如图 2(b)所示. K_2 截止, K_1 与 S 同时导通或截止.双输入 Buck 变换器运行方式: K_1 与 S 导通时,电感充电; K_1 与 S 截止时,电感放电.双输入 Buck 变换器稳态运行于 CCM 模式的开关控制信号如图 3 所示.由图 3 可知,两种 Buck 变换器具有相同的控制信号.

3.2 最优加载运行

双输入 Buck 变换器最优加载运行电路和最优加载波形如图 2(c)和图 4 所示. K_1 截止, K_2 与 S 同时导通或截止.当负载电流阶跃增加时, K_2 与 S 同时导通,电感电流迅速上升,直到最佳关断时刻 t_2 ;之后, K_2 与 S 同时截止,电感电流下降,当等于负载电流时,电路进入稳态, K_1 与 S 同步运行.

3.3 最优加载瞬态特性

根据文献[16]得到双输入 Buck 变换器的最优加载响应时间

$$t_{si} = \frac{L\Delta i_o}{\sqrt{(v_A + v_B)v_o - v_o}} \quad (1)$$

和最优加载超调量

$$\Delta U_o^{\text{undershoot}} = -\Delta i_o R_C - \frac{[CR_C(v_A + v_B - U_o) - L\Delta i_o]^2}{2LC(v_A + v_B - U_o)} \quad (\Delta i_o > \Delta I_{oi}^{\text{TH}}) \quad (2)$$

或

$$\Delta U_o^{\text{undershoot}} = -\Delta i_o R_C (\Delta i_o < \Delta I_{oi}^{\text{TH}}) \quad (3)$$

其中, $\Delta I_{oi}^{\text{TH}}$ 为双输入 Buck 变换器的加载阈值,即

$$\Delta I_{oi}^{\text{TH}} = \frac{CR_C}{L}(v_A + v_B - v_o) \quad (4)$$

由式(1)可知,欲有效提高加载速度,附加电源电压应满足 $v_B \geq v_A$,结合计算机主机的电源输出情况,同时防止 CPU 周围出现过高电压,建议取值 $v_B = v_A$.

3.4 附加电源 v_B 切换

由上文分析可知,附加电源 v_B 仅仅工作于加载后

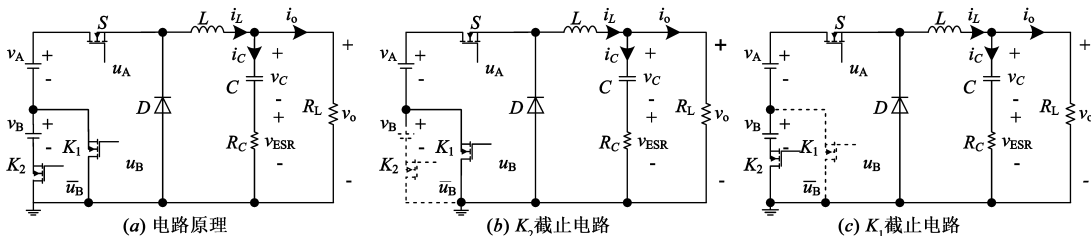


图2 双输入Buck变换器

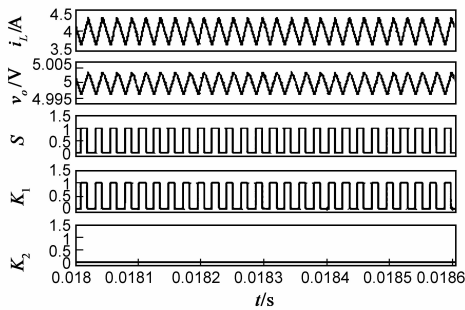


图3 双输入Buck变换器稳态运行波形

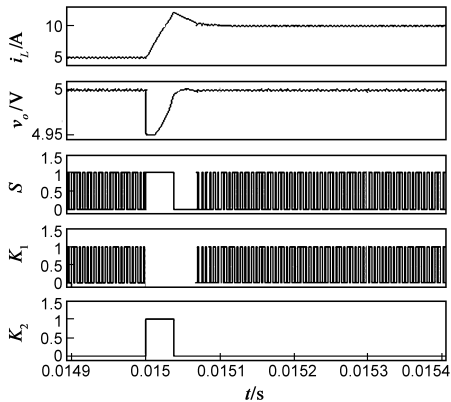


图4 双输入Buck变换器最优加载波形

一段时间. 因此, 加载情形的判定是双输入 Buck 变换器控制的关键. 为了避免频繁切入或不恰当退出 v_B , 本文规定: 负载加载跃变量超过某一数值时, v_B 切入; 输出电压跌落量小于另一数值时, v_B 退出.

3.4.1 切入原则

当 $\Delta i_o < \Delta I_{oi}^{TH} (< \Delta I_{oi}^{TH(dual)})$ 时, 输出电压跌落量较小且与输入电压无关, 同时为了更大范围提高加载性能, 本文约定加载量大于单输入 Buck 变换器加载阈值时切入 v_B , 则切入条件为

$$\Delta i_o > \Delta I_o^{\text{switchon}} \quad (5)$$

其中, $\Delta I_o^{\text{switchon}}$ 称为 v_B 切入的负载电流跃变量边界值,

$$\Delta I_o^{\text{switchon}} = \Delta I_{oi}^{TH} = \frac{CR_C}{L} (v_A - v_o).$$

联合图 1 和不等式(5), 将 v_B 切入条件转化为

$$\Delta v_o > \Delta v_o^{\text{switchon}} \quad (6)$$

其中, $\Delta v_o^{\text{switchon}}$ 称为 v_B 切入的输出电压跌落量边界值,

$$\Delta v_o^{\text{switchon}} = R_C \Delta I_o^{\text{switchon}} = \frac{CR_C^2}{L} (v_A - v_o).$$

3.4.2 退出原则

为了避免过早退出 v_B 而影响加载性能, 本文约定: 当 Buck 变换器输出电压跌落量小于最小稳态输出电压纹波 ($\Delta v_o^{\text{ripple}}(\min)$) 时, v_B 退出, 则退出条件为

$$\Delta v_o < \Delta v_o^{\text{switchoff}} \quad (7)$$

其中, $\Delta v_o^{\text{switchoff}}$ 称作附加电源退出的输出电压跌落量边界值, $\Delta v_o^{\text{switchoff}} = \Delta v_o^{\text{ripple}}(\min)$.

假设双输入 Buck 变换器工作于 CCM 模式, 由文献 [19] 得

$$\Delta v_o^{\text{ripple}}(\min) = \frac{v_o \left(1 - \frac{v_o}{v_A}\right)}{Lf_{s(\max)}} \left(R_C + \frac{1}{8Cf_{s(\max)}}\right) \quad (8)$$

当输出电压跌落量再次满足不等式(6)时, v_B 再次切入; 当输出电压跌落量再次满足不等式(7)时, v_B 再次退出. 如果双输入 Buck 变换器按最优加载特性运行, 则 v_B 只需要在加载的初始阶段切入一次即可.

3.4.3 附加电源切换控制器

根据前两节的分析, 当输出电压跌落量满足不等式(6)或(7)时, 切换 v_B . 为防止误切换, 本文用 $\Delta v_o^{\text{switchon}}$ 和 $\Delta v_o^{\text{switchoff}}$ 构造滞环比较器的滞环窗口, 由此产生 v_B 切换控制信号. 构造方式如图 5 所示.

图 5 中, Δv_o 为输出电压纹波, $A (= \Delta v_o^{\text{switchoff}})$ 为 v_B 退出条件; $B (= \Delta v_o^{\text{switchon}})$ 为 v_B 切入条件.

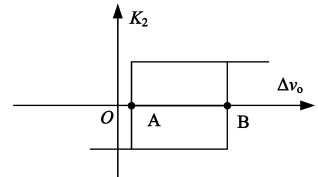


图5 附加电源切换控制器

4 仿真分析

双输入 Buck 变换器的电路参数与设计指标: 输入电压 $v_A = 12V$, $v_B = 12V$, 输出电压期望值 $U_d = 5V$, 负载电阻 $R_L: R_{L\min}(100\Omega) \sim R_{L\max}(0.25\Omega)$, 滤波电感器 $L = 100\mu H$, 滤波电容器 $C = 1880\mu F$, 滤波电容的串联等效电阻 $R_C = 10m\Omega$. 由式(5)算得 $\Delta I_o^{\text{switchon}} = 1.316A$, 即 $\Delta v_o > \Delta v_o^{\text{switchon}} = 13.16mV$. 双输入 Buck 变换器的控制电路方案图 6 所示, 控制器采用滑模控制.

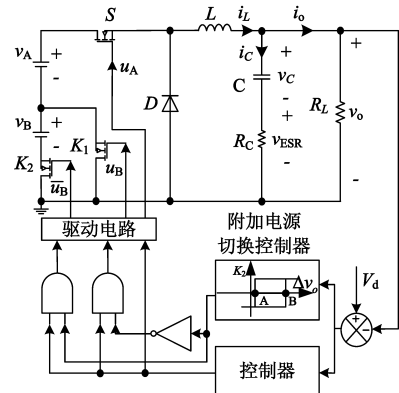


图6 双输入Buck变换器实现方案

图 7 所示为负载电流从 5A 跃变至 10A 时, 两种变换器的加载波形对比图. 由图 7 可知, 两种变换器的输出电压跌落量分别为 95mV 和 50mV, 双输入 Buck 变换

器小 45mV;稳态调节时间分别为 160 μ s 和 75 μ s,双输入 Buck 变换器快 85 μ s.可见,双输入 Buck 变换器的加载瞬态特性优于单输入 Buck 变换器.

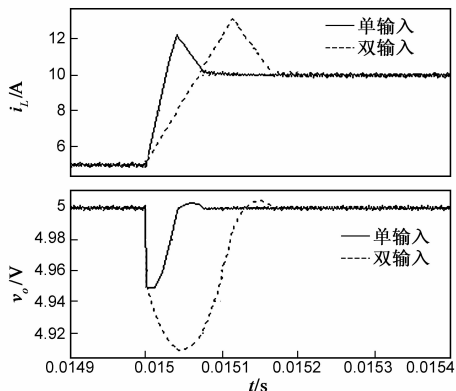


图7 两种Buck变换器加载波形对比图

5 实验验证

实验方案如图 8 所示.在图 8 中,实验参数与仿真参数一致,驱动电路采用 IR2112 集成电路芯片,控制器采用 TMS320F2812 平台.

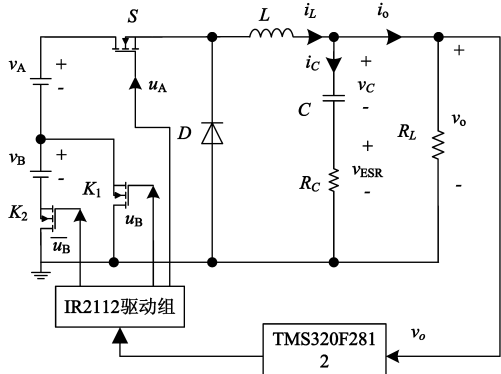


图8 双输入Buck变换器实验原理图

如图 9 所示为负载从 5A 阶跃增加至 10A 时两种 Buck 变换器的最优加载实验波形.由图 9 可知,两种 Buck 变换器的输出电压跌落量分别为 100mV 和 50mV,双输入 Buck 变换器小 50mV;二者稳态调节时间分别约为 180 μ s 和 80 μ s,双输入 Buck 变换器快 100 μ s.双输入 Buck 变换器具有更优越的加载响应特性.

6 结论

本文提出了一种应用于 VRM 主电路的双输入 Buck 变换器,分析了其最优加载特性,并给出了一种实现方案.对比单输入 Buck 变换器,仿真研究了双输入 Buck 变换器的加载特性,仿真和实验结果表明双输入 Buck 变换器具有更快的加载响应速度和更小的输出电压跌落量.双输入 Buck 变换器结构简单,控制实现方

便,适合用于 VRM 主电路.

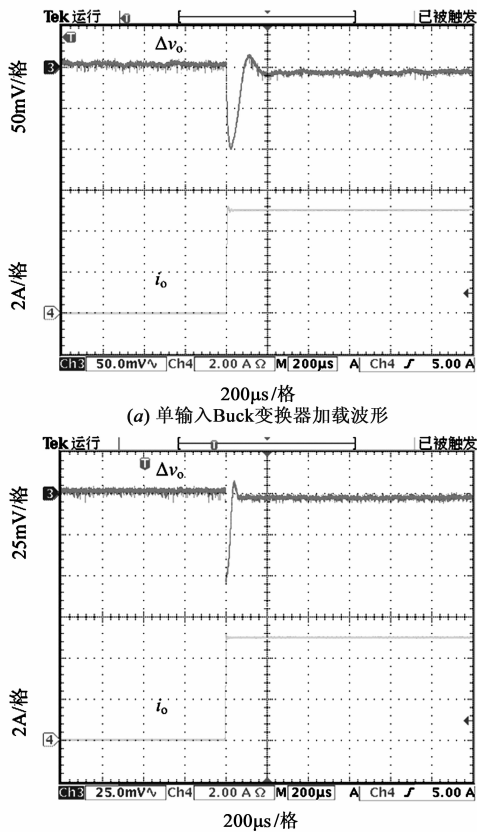


图9 两种Buck变换器的最优加载实验波形

参考文献

- [1] Castilla M, et al. Designing VRM hysteretic controllers for optimal transient response [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1726 – 1738.
- [2] Tan S C, et al. General design issues of sliding-mode controllers in DC DC converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 1160 – 1174.
- [3] 包伯成,等.斜坡补偿 Buck 变换器工作状态域估计[J].电子学报,2009,37(12):2787 – 2791.
Bao Bo-cheng, et al. Estimation of operating state regions for buck converter with ramp compensation [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2787 – 2791. (in Chinese)
- [4] Goder D, et al. V² architecture provides ultra fast transient response in switch mode power supplies [A]. Hsu C F. Proceedings of High Frequency Power Conversion Conference [C]. Las Vegas, Nevada: IEEE Press, 1996. 19 – 23.
- [5] 王凤岩,等.V²C 控制 Buck 变换器分析[J].中国电机工程学报,2006,26(2):121 – 126.
Wang Fengyan, et al. Modeling and analysis of V²C controlled buck converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 121 – 126. (in Chinese)
- [6] 吴建华,等.一种基于时间序列的 CCMBuck 变换器瞬态

- 精确解析分析方法[J]. 电子学报, 2011, 39(2): 435 - 439.
WU Jian-hua, et al. An exact transient analysis approach based on time-sequence for CCM buck switching converters[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(2): 435 - 439. (in Chinese)
- [7] Sun Julu, et al. A novel input-side current sensing method to achieve AVP for future VRs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5): 1235 - 1242.
- [8] 罗萍, 等. PSM 开关变换器的大信号模型与瞬态特性[J]. 电子学报, 2004, 32(11): 1829 - 1832.
Luo Ping, et al. Large signal model and transient characteristic of PSM switching converter[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(11): 1829 - 1832. (in Chinese)
- [9] Dong Yan, et al. Twisted Core coupled inductors for microprocessor voltage regulators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2536 - 2545.
- [10] Masao U, et al. A current compensation circuit for VRM in the sudden change of the load[A]. Tekwani, P. N. Proceedings of the 11th European Conference on Power Electronics and Applications[C]. Dresden, Germany: IEEE, 2005. 1 - 9.
- [11] Abdel-Rahman O, et al. Transient response improvement in DC-DC converters using output capacitor current for faster transient detection[A]. Issa Batarseh. Proceedings of the 38th Power Electronics Specialists Conference[C]. Orlando, Florida, USA: IEEE, 2007. 157 - 160.
- [12] Ordóñez M, et al. Critical parameters in the transient response of synchronous buck converters[A]. Issa Batarseh. Proceedings of the 38th Power Electronics Specialists Conference[C]. Orlando, Florida, USA: IEEE, 2007. 2189 - 2195.
- [13] Lu D Dah-Chuan, et al. A single phase voltage regulator module (VRM) with stepping inductance for fast transient response[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 22(2): 417 - 424.
- [14] Singh R P, et al. Buck-derived topology with improved step-down transient performance[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(6): 2855 - 2866.
- [15] 李演明, 等. 具有快速瞬态响应和低静态电流的 CMOS 低漏失稳压器设计[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1130 - 1135.
LI Yan-ming, et al. A fast-transient response and low-quiet-current CMOS low-dropout regulator[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 1130 - 1135. (in Chinese)
- [16] 倪雨, 等. Buck 变换器最优负载瞬态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(24): 8 - 14.
Ni Yu, et al. Optimal load transient performance analysis for buck converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(24): 8 - 14. (in Chinese)
- [17] Chen Y M, et al. Double-input PWM DC/DC converter for high/low voltage sources[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 3(5): 1538 - 1345.
- [18] 杨东升, 等. 双输入 Buck 变换器的单周期控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 162 - 171.
Yang Dongsheng, et al. One-cycle control for double-input buck converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society 2012, 27(1): 162 - 171. (in Chinese)
- [19] 刘郑辉, 等. 基于 Buck 电路的开关电源纹波的计算和抑制[J]. 湖北工业大学学报, 2007, 22(5): 22 - 24.
Liu Zhenghui, et al. On calculation of switch ripple current based on buck circuit[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2007, 22(5): 22 - 24. (in Chinese)

作者简介



倪雨男, 1978年4月生于四川成都. 工学博士, 现为成都信息工程学院控制工程学院副教授, 研究方向为开关 DC-DC 变换器电路拓扑及滑模控制技术.

E-mail: niyuheiger@163.com